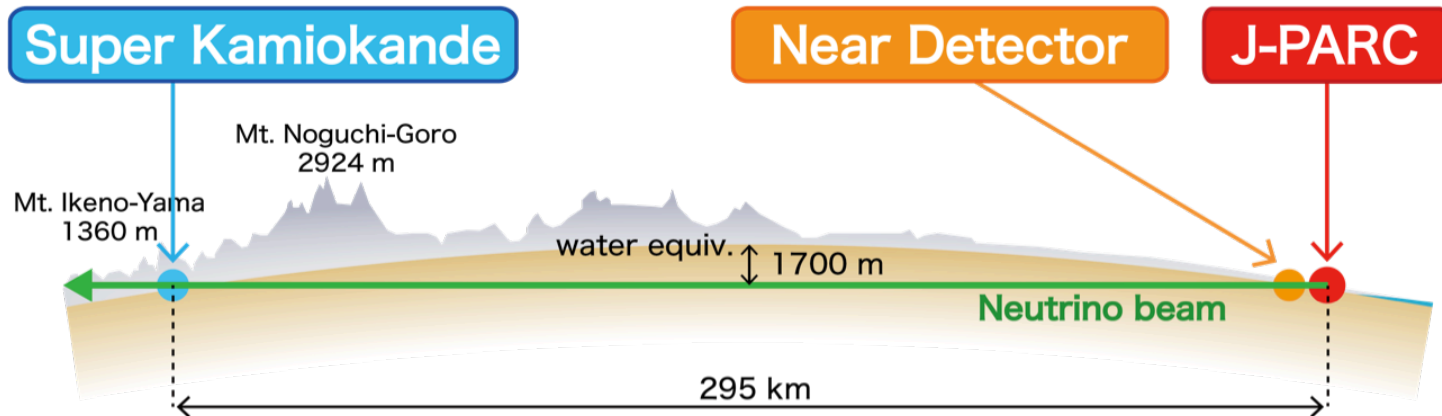


# ニュートリノ反応の精密測定に向けた 高位置分解能ファイバートラッカーの開発

京都大学 高エネルギー物理学研究室  
平本 綾美



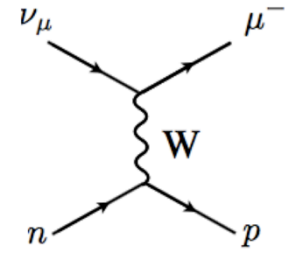
# T2K実験



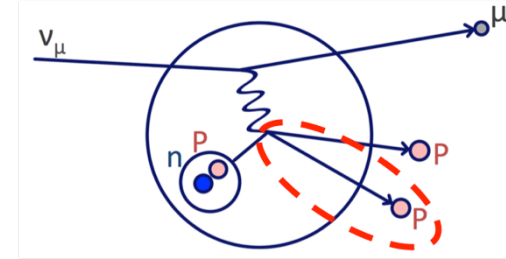
- ❖ J-PARCからニュートリノビームをスーパーカミオカンデまで飛ばす  
長基線ニュートリノ振動実験
- ❖ 混合角 $\theta_{23}$ の精密測定およびCP破れの位相 $\delta_{cp}$ の観測をめざす
- ❖ ニュートリノ反応断面積の不定性が現在約5%ある系統誤差の大きな要因  
→ ニュートリノ反応点周りの詳細な理解が必要

# 2p-2h反応による不定性

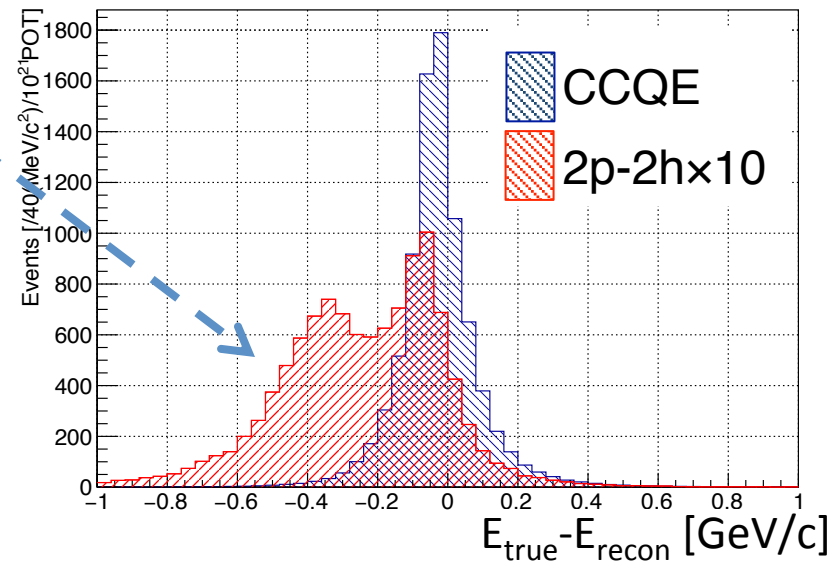
- ❖ T2Kの主なシグナルは  
CCQE (Charged Current Quasi Elastic)反応  
(=レプトンのみで $E_\nu$ を再構成できる)
- ❖ 陽子が2本出てくる**2p-2h反応**の存在が  
注目されている(CCQEの約10%)
- ❖ 陽子を見ることができないスーパーカミオカンデで再構成される**ニュートリノの  
エネルギー分布を変えてしまう**
- ❖ スーパーカミオカンデにおいて  
正しく2p-2hを見積もりたい  
→陽子の飛跡が非常に短く(~数cm)、  
**現在の前置検出器で直接観測が困難**



CCQE反応



2p-2h反応



より高い位置分解能の検出器で  
2p-2hを直接観測して理解したい

# 原子核乾板を用いた測定

## NINJA実験

### J-PARC T60/T66実験

❖ 水/鉄ターゲットの原子核乾板検出器ECC

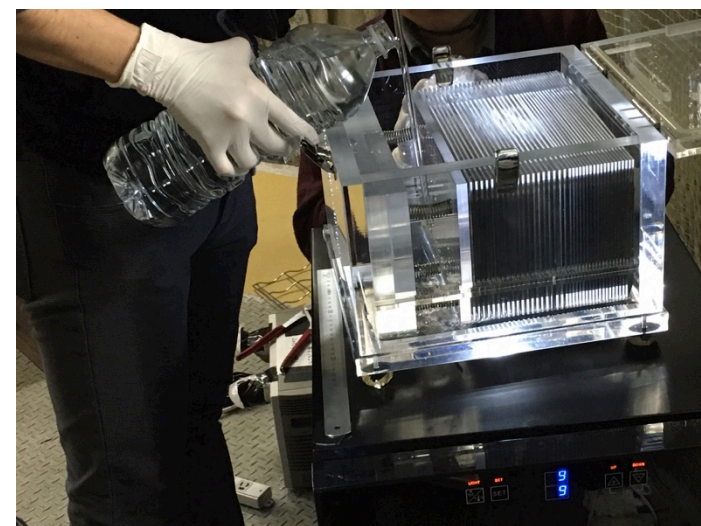
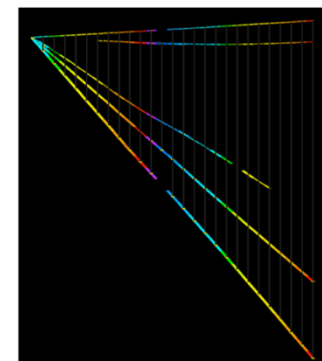
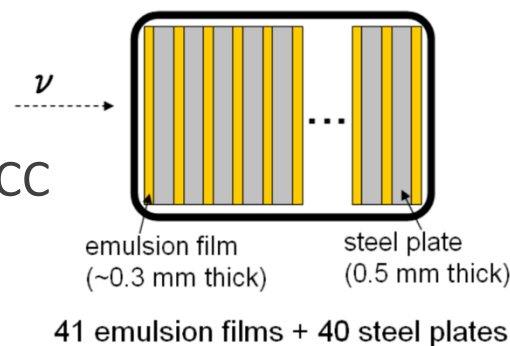
❖ サブミクロンの位置分解能で  
陽子の飛跡を見ることができる

❖ 2018年後半に200kgの水ターゲット  
で観測を行う予定

→ 2p-2h反応を直接観測し、  
系統誤差の削減を目指す！

鉄ターゲットECC

観測されたイベント



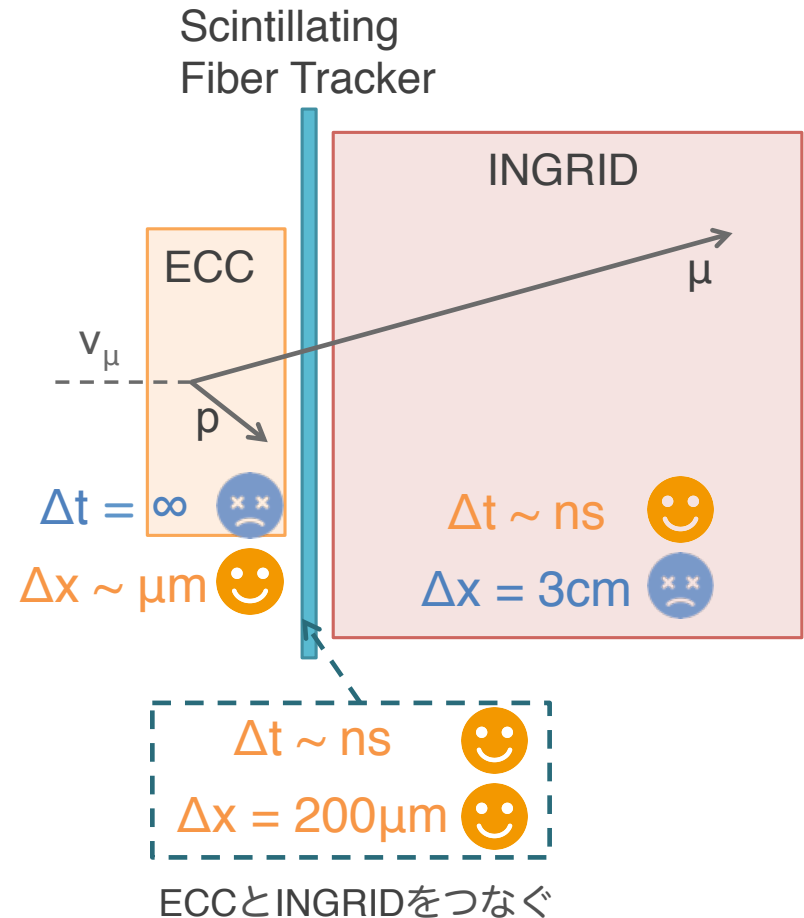
2017年1月に設置した  
水ターゲットECC →

# トラックマッチング

- ❖ ミューオンIDのために後ろにT2K前置検出器INGRIDを設置  
→ ECCとINGRIDのトラックマッチングを行う
- ❖ ECCは時間分解能を持たない
- ❖ INGRIDの位置分解能( $\sim 3\text{cm}$ )では  
ECCのトラックを1本にしぼることができない  
→ 両者をつなぐトラッカーをあいだに置く  
→ Scintillating Fiber Trackerの導入

## 要求性能

- $200\mu\text{m}$ の分解能があること
- INGRIDをおおう  $1\text{m}\times 1\text{m}$ 以上の大きさが実現可能であること
- なるべく少ないチャンネル数であること



# Scintillating Fiber Tracker

❖ ファイバーによる位置検出：2mm角ファイバーを使った時の位置分解能は？

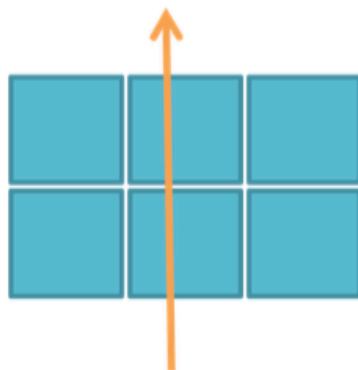
A) そのまま並べる →  $\sim 580\mu\text{m}$

B) ずらして並べる →  $\sim 290\mu\text{m}$

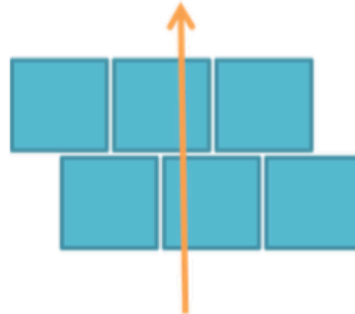
C) → 隣り合うファイバーの光量比を用いて位置を検出する新しいアイデア

本研究に限らず、パイルアップの心配がなければ汎用可能な  
新しいファイバートラッカーのベンチマーク

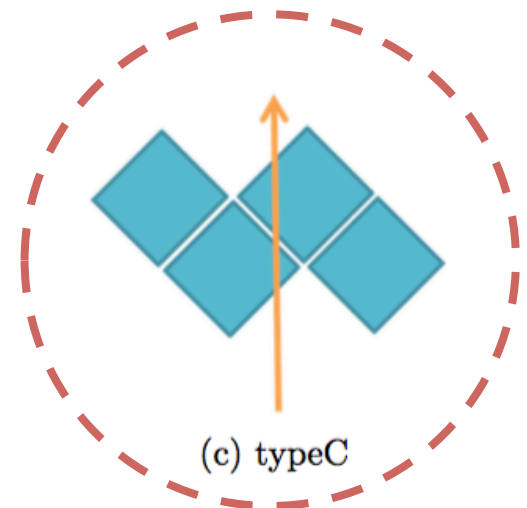
この方法を用いて、より高い位置分解能を目指す！



(a) typeA



(b) typeB



(c) typeC

# 光量比を用いた新たなアイデア

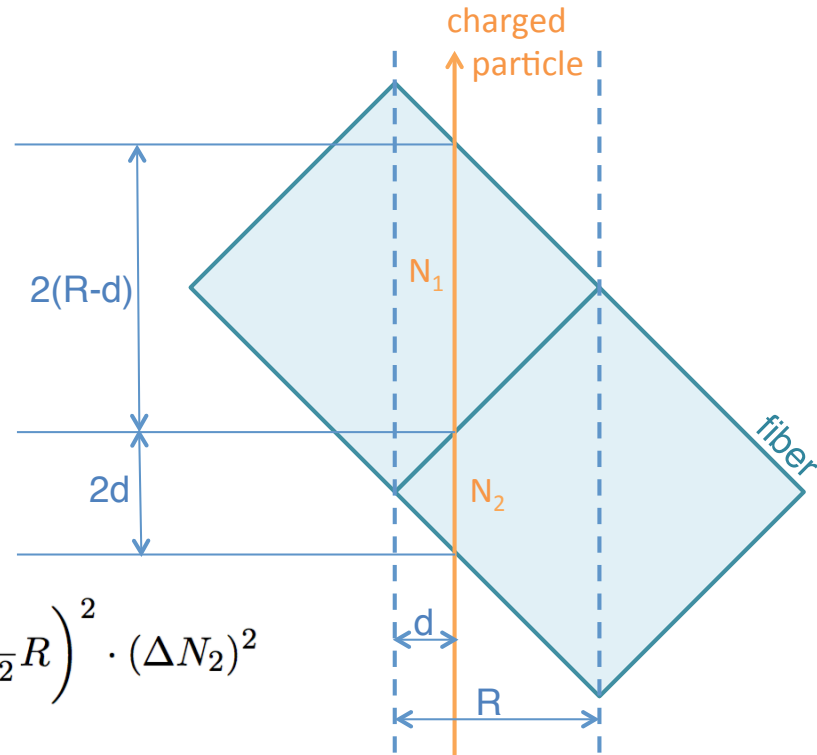
- ❖ ファイバーの光量をそれぞれ  $N_1$ ,  $N_2$  とすると粒子の通過した位置  $d$  は

$$d(N_1, N_2) = \frac{N_2}{N_1 + N_2} R$$

このとき  $d$  のゆらぎ (= 位置分解能) は

$$(\Delta d)^2 = \left( \frac{N_2}{(N_1 + N_2)^2} R \right)^2 \cdot (\Delta N_1)^2 + \left( \frac{N_1}{(N_1 + N_2)^2} R \right)^2 \cdot (\Delta N_2)^2$$

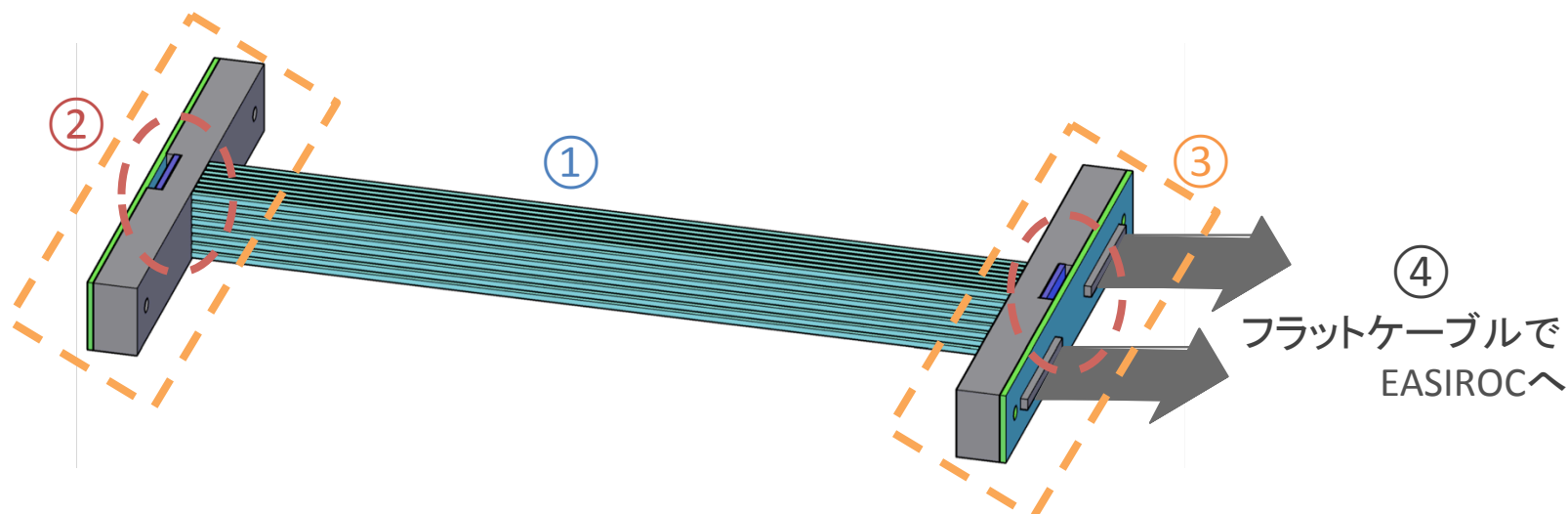
$$(\Delta N_1 = \sqrt{N_1}, \Delta N_2 = \sqrt{N_2})$$



となるので、ここから  $200\mu\text{m}$  の位置分解能に必要な光量がわかる

$$\rightarrow N_1 + N_2 > 12.5 \text{ p.e.}$$

# プロトタイプ検出器の制作



① Scintillating fiber (Kuraray SCSF-78)

- 2mm角ファイバー
- 長い減衰長
- 450nmの発光波長

② 光検出器MPPC

- 3mm角 64ch MPPCアレイ
- 450nmに最高感度波長

③ ファイバークッキー+読み出しボード

④ NIM EASIROCモジュール

- 64chのMPPCを同時駆動

❖ ファイバーの長さや条件の異なる複数のプロトタイプ検出器を製作し、性能評価を行った

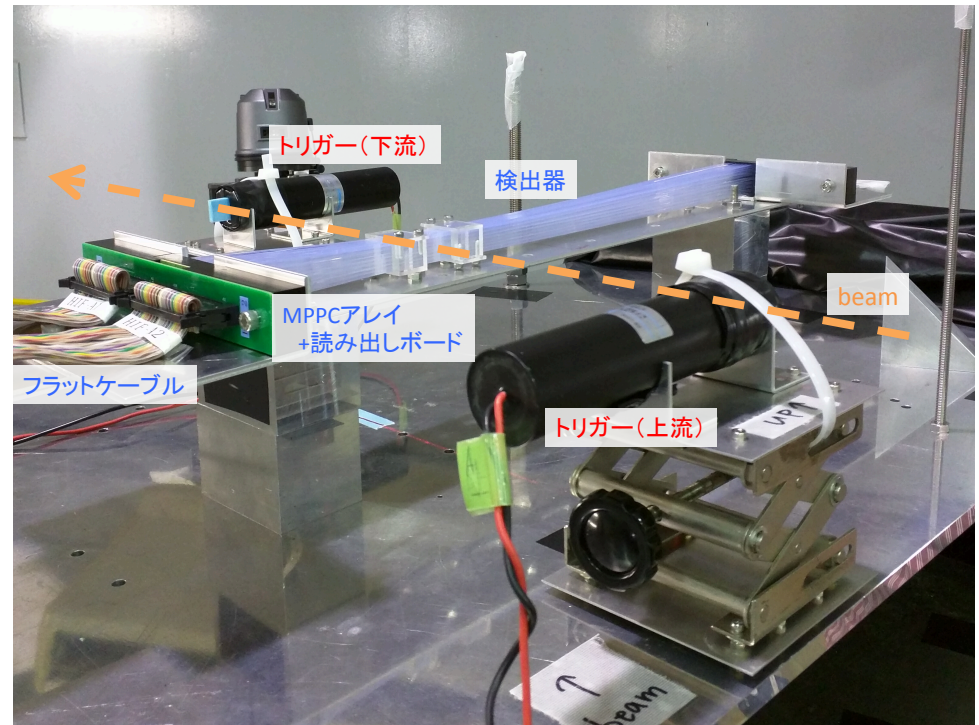


# 陽電子ビームによる性能評価

❖ 東北大学電子光物理学研究センターにて675MeV/cの陽電子ビームを照射

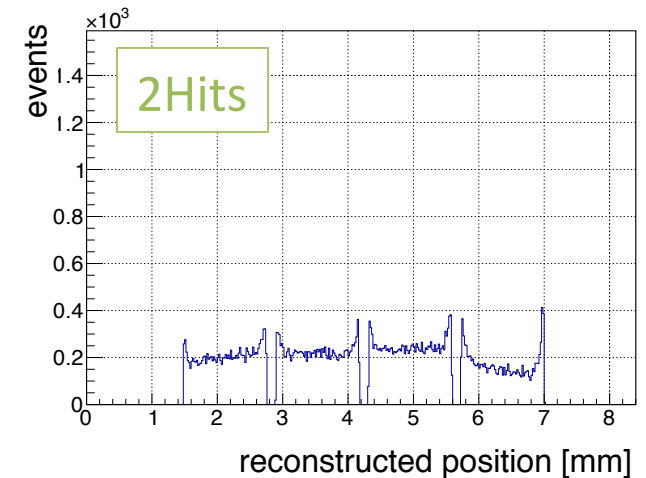
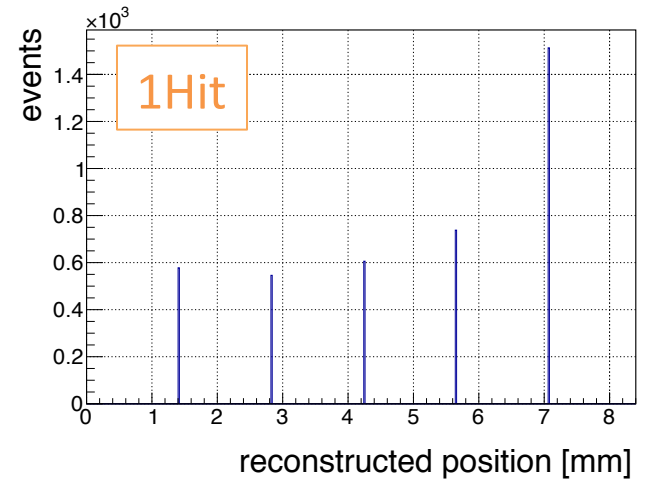
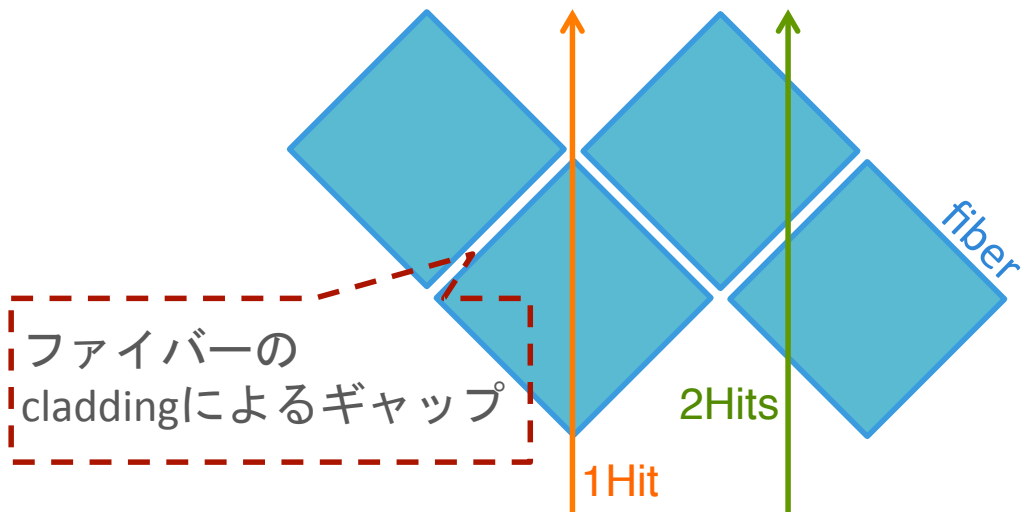
## 測定項目

- ファイバーの光量測定
- 検出器のHit efficiency
- 位置分解能の測定
- 読み出しまでの距離と位置分解能の関係
- ファイバーの条件を変えた測定
- 位置分解能の入射角度依存性



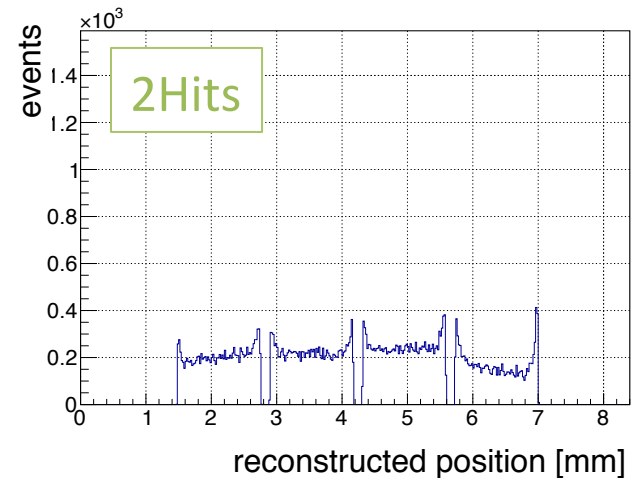
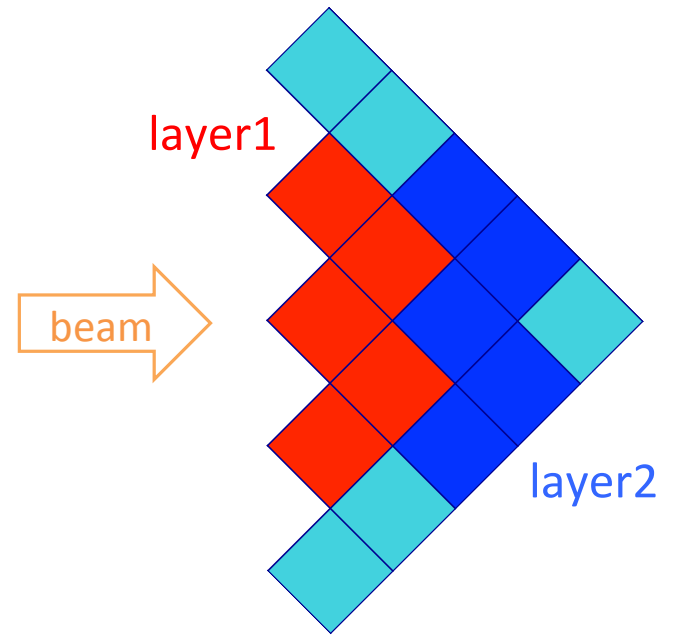
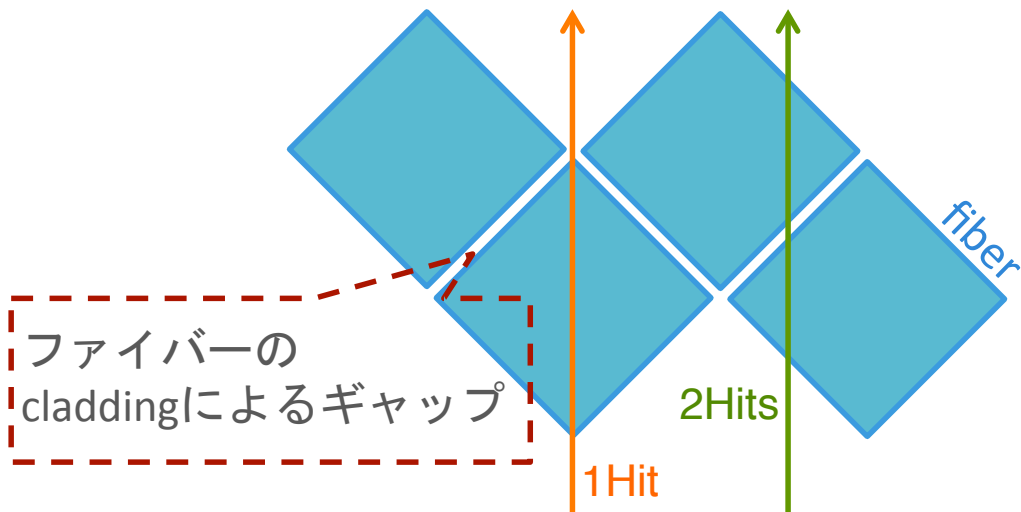
# 位置分解能

- ❖ 読み出しから15cmの位置にビームを照射
- ❖ ファイバーのcladが不感領域となり、  
1Hitと2Hitsのイベントが存在  
→2Hitsのイベントを使って位置を再構成
- ❖ 2レイヤー間で再構成された位置の差をとることによって位置分解能を評価



# 位置分解能

- ❖ 読み出しから15cmの位置にビームを照射
- ❖ ファイバーのcladが不感領域となり、1Hitと2Hitsのイベントが存在  
→2Hitsのイベントを使って位置を再構成
- ❖ 2レイヤー間で再構成された位置の差をとることによって位置分解能を評価



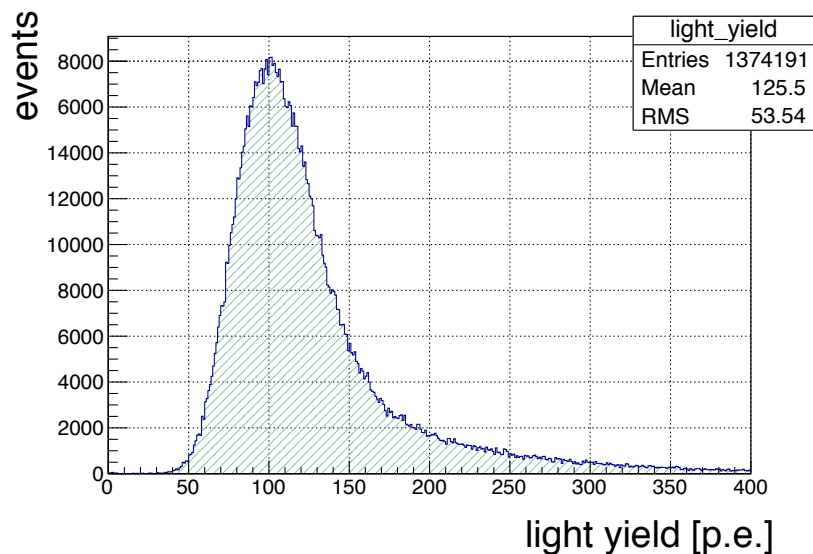
# 位置分解能(結果)

- ❖ 光量は1レイヤーで100p.e. (>12.5p.e.)  
→ 200 $\mu\text{m}$ の分解能を達成するのに十分
- ❖ 読み出しから15cmの位置で $149.6 \pm 1.6 \mu\text{m}$   
(2レイヤーの差の $1/\sqrt{2}$ )  
→ MCでの93.1 $\mu\text{m}$ には達していない...

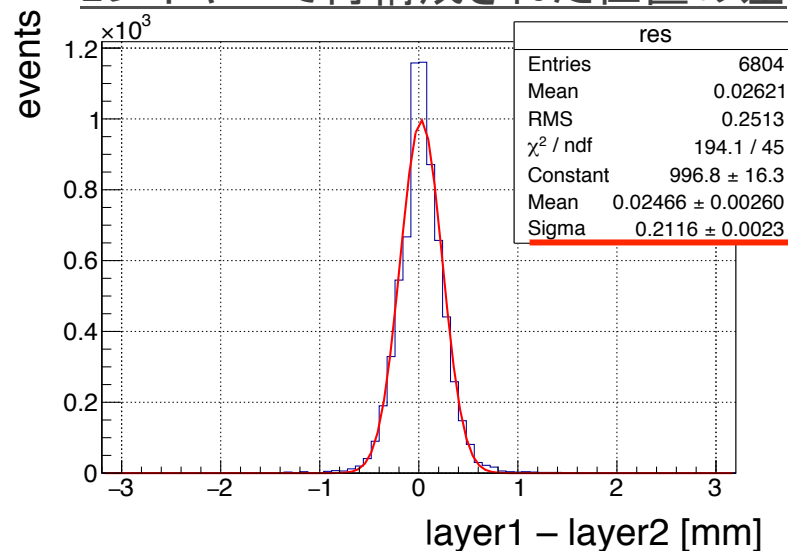
## ・悪化する原因

- ファイバーのアライメント
- ファイバー端面のクオリティ
- オプティカルクロストーク
- フラットケーブル、エレキ関連

レイヤーの合計光量

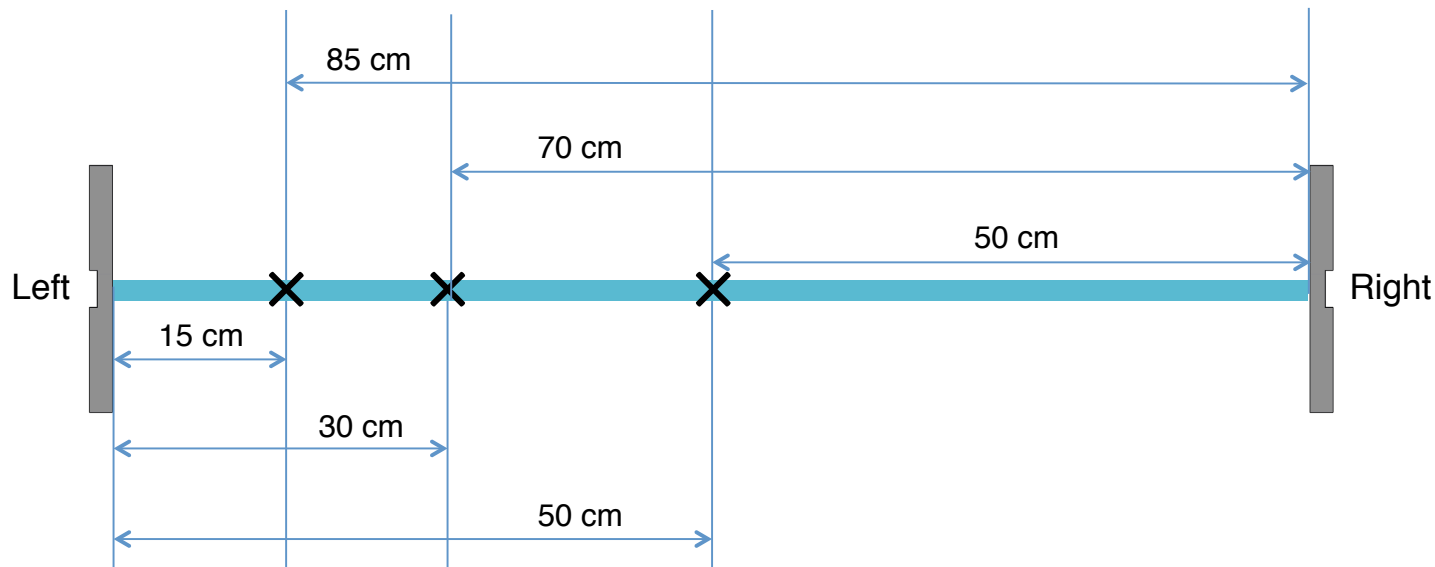


2レイヤーで再構成された位置の差

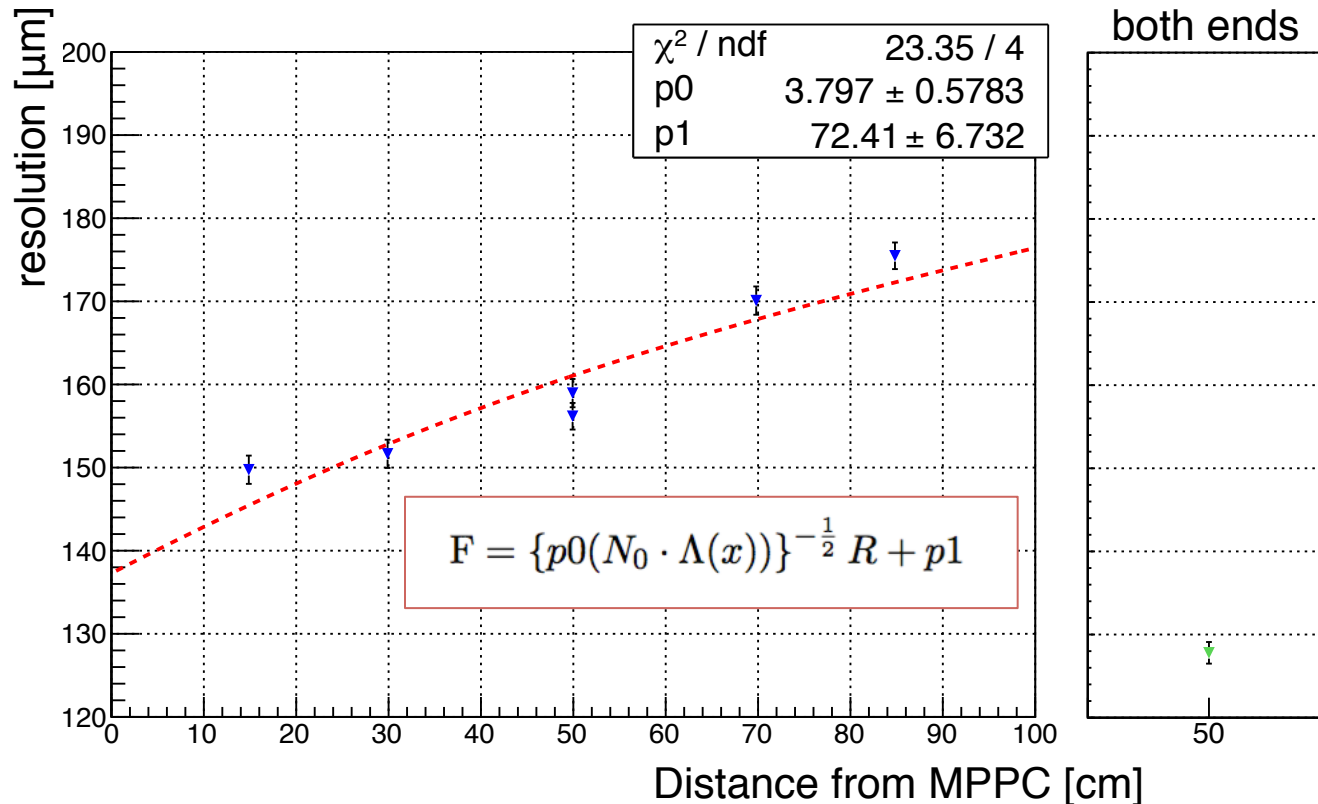


# 読み出しまでの距離と位置分解能の関係

- ❖ 1mの長さの両読み検出器の3点にビームを照射  
→15, 30, 50, 70, 85cmの位置での位置分解能を測定
- ❖ 両読みでの位置分解能も測定  
→光量が増えるので位置分解能が良くなることが期待される



# 読み出しまでの距離と位置分解能の関係(結果)



- ❖ 読み出し位置による分解能の変化  
→ 光量が減るので位置分解能は悪化(光量の減衰で説明できる変化)
- ❖ 両読みにすると光量が2倍になる: 位置分解能  $127.8 \pm 1.3 \mu\text{m}$   
→ MIPミュオンに換算すると  $163.2 \mu\text{m}$ : 200 $\mu\text{m}$ 以下を達成!

# その他の結果

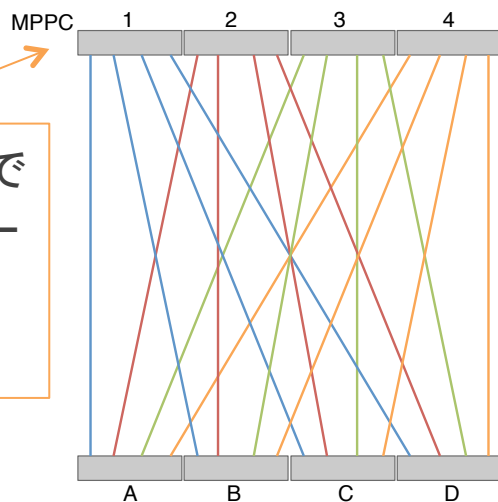
- ❖ 入射粒子に角度があると位置分解能は悪化(入射角度依存性)  
→どこまで影響を減らすことができるかが今後の課題
- ❖ オプティカルクロストークに関する測定: 反射材や黒ペイントをしない  
ほうが位置分解能はよい...
  - ▷反射材や黒ペイントを塗ると数%あったクロストークは抑制されるが、  
光量が30%程度減るため位置分解能向上にはつながらない
  - フラットケーブルのノイズなどを改善することで、これ以上の位置分解能  
を得ることができると可能性がある

# 今後の展望

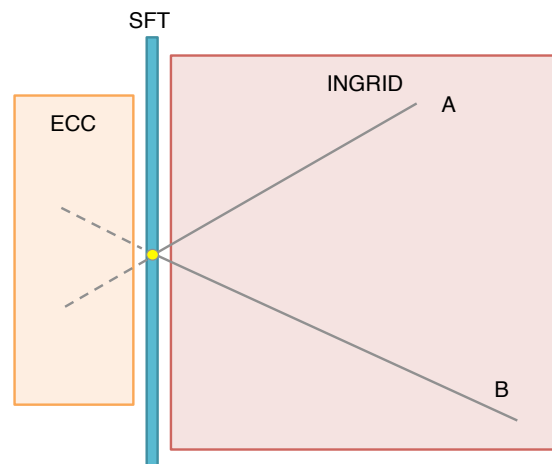
ビームテストの結果より、トラッカーが十分な光量を持ち垂直入射で200 $\mu$ mの位置分解能を達成可能であることがわかった→次のステップは？

- ❖ さらなるチャンネル数の削減  
→まとめ読み出しは可能か？

ひとつのMPPCで  
4本のファイバー  
を読む  
→8chで16本



- ❖ 大角度のときのトラックマッチング  
→INGRIDの角度情報を利用できる？



## その他

- アライメント手法、J-PARCにおけるDAQシステムの最適化
- 光量による粒子識別はできるか？



# Summary

- ❖ T2K実験における系統誤差削減のため、原子核乾板を用いてニュートリノ反応点周りの詳細な観測を行う実験が進行中
- ❖ 原子核乾板を用いた検出器ECCとT2K前置検出器INGRIDのトラックをつなぐため、2mm角ファイバーとMPPCを用いたScintillating Fiber Trackerを開発
- ❖ 光量比を用いる新しいアイデアで200 $\mu\text{m}$ の位置分解能を目指す
  - ▷ 陽電子ビームで $127.8 \pm 1.3 \mu\text{m}$ を達成 (両読み、読み出しから50cm)  
→MIPミュオンに換算すると163.2 $\mu\text{m}$ を達成!
- ❖ 今後は実機に向けてエレキやDAQの最適化、トラックマッチングの手法の確立などを行う

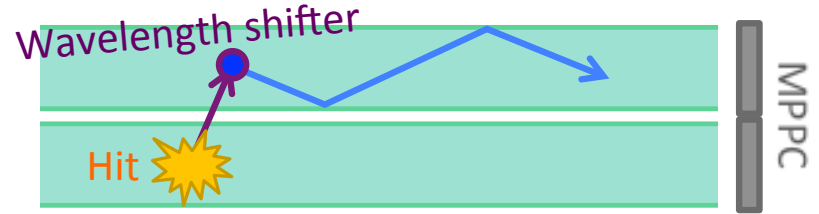


Backup



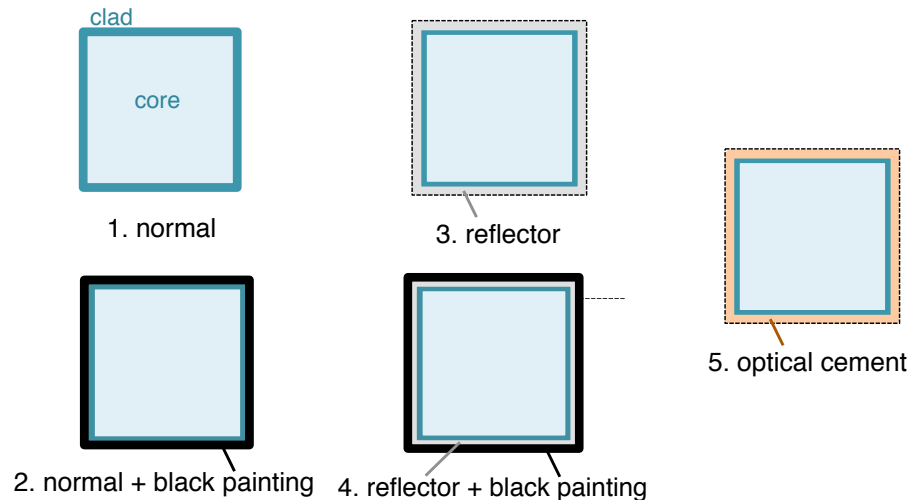
# ファイバーの条件を変えた測定

- ❖ シンチレーション光が隣のファイバーに入ることにより、**オプティカルクロストーク**が発生する

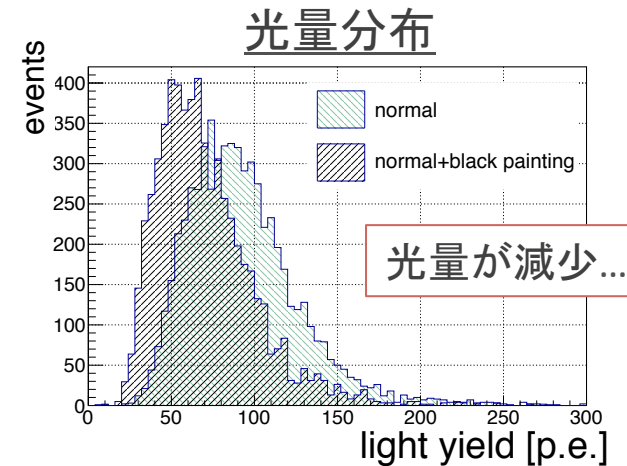
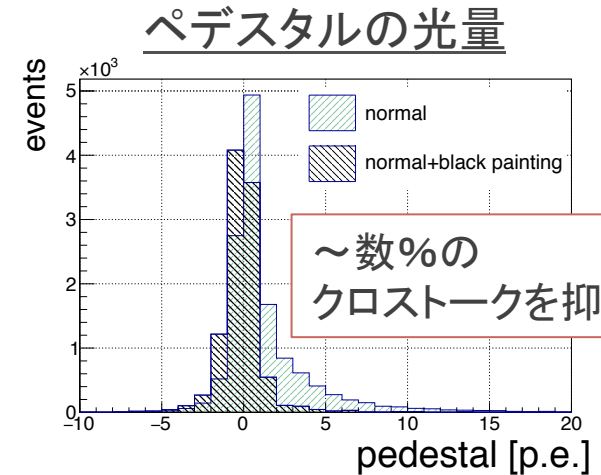
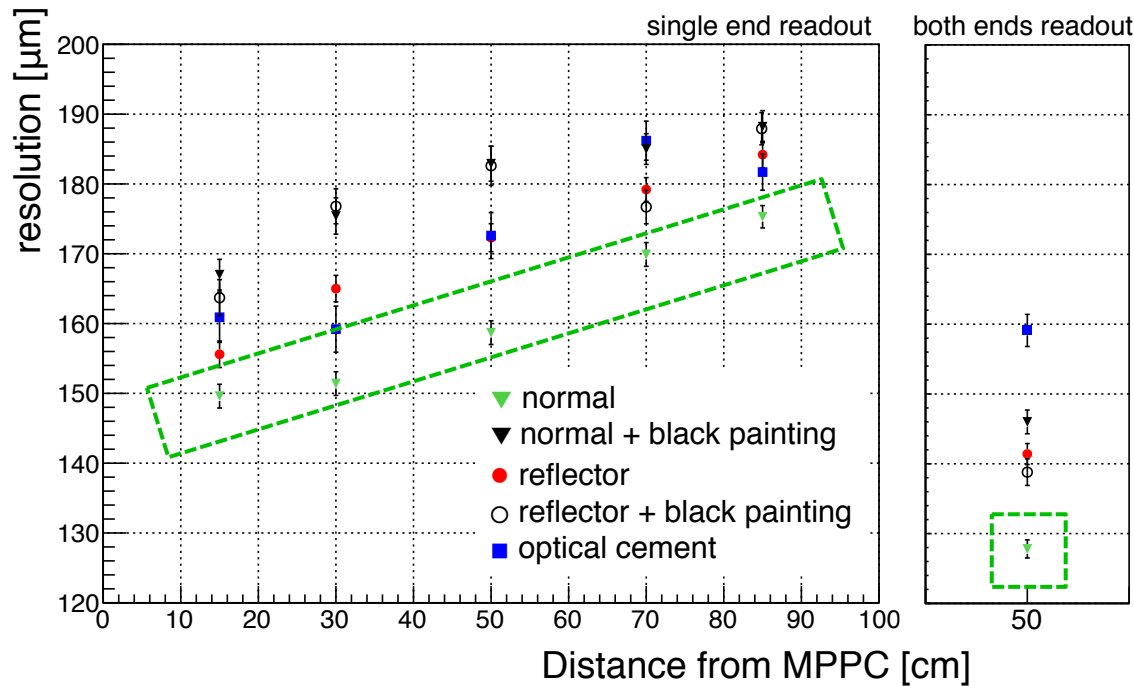


- ❖ 黒ペイント、反射材、オプティカルセメントを塗布し、**光量やクロストーク**が変化することにより、**位置分解能**がどのように影響を受けるかを調査  
→**5種類のファイバー**を準備

- 1. normal fiber
- 2. black painting
- 3. reflector
- 4. reflector + black painting
- 5. optical cement



# ファイバーの条件を変えた測定(結果)



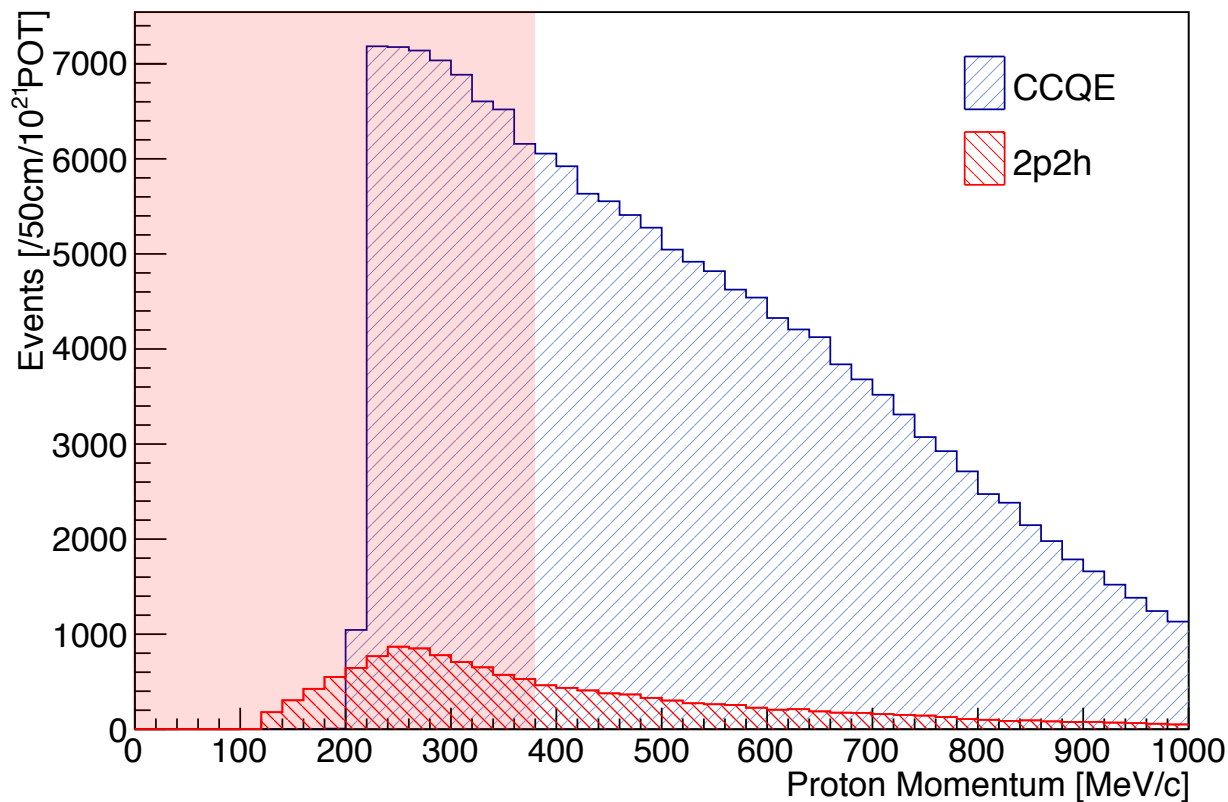
❖ normal fiberの位置分解能がいちばんよい

❖ 黒ペイントや反射材などを塗ると

クロストークは減るが光量が30%ちかく低下

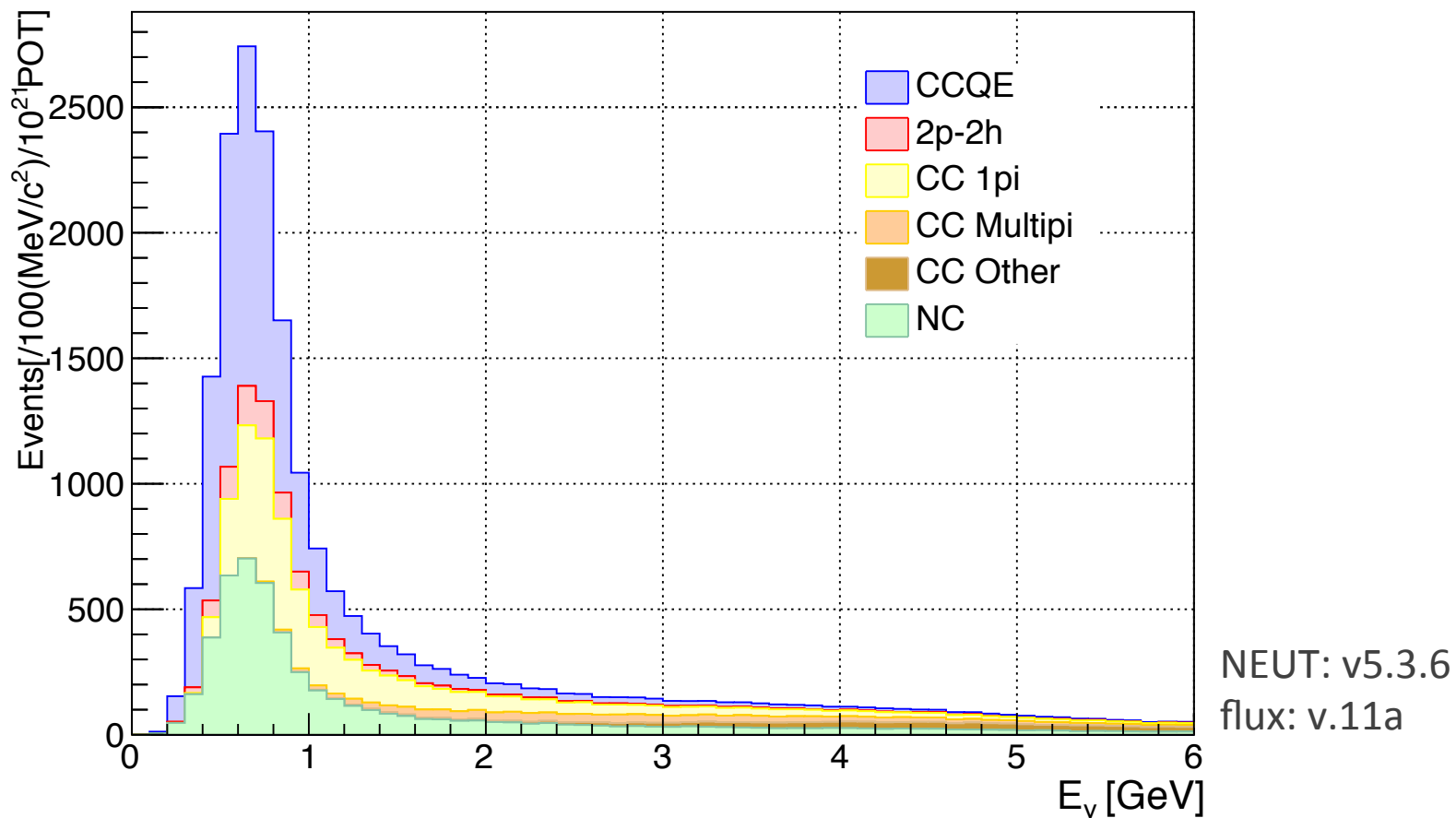
→位置分解能が悪化、クロストーク抑制による大きな効果は見られない

# 2p-2h反応補足



陽子の運動量～数百MeV→ポリスチレン中で数cmしか飛ばない  
赤い領域＝飛跡が5cm以下(=現在の前置検出器で見れない)

# ニュートリノ反応のシミュレーション



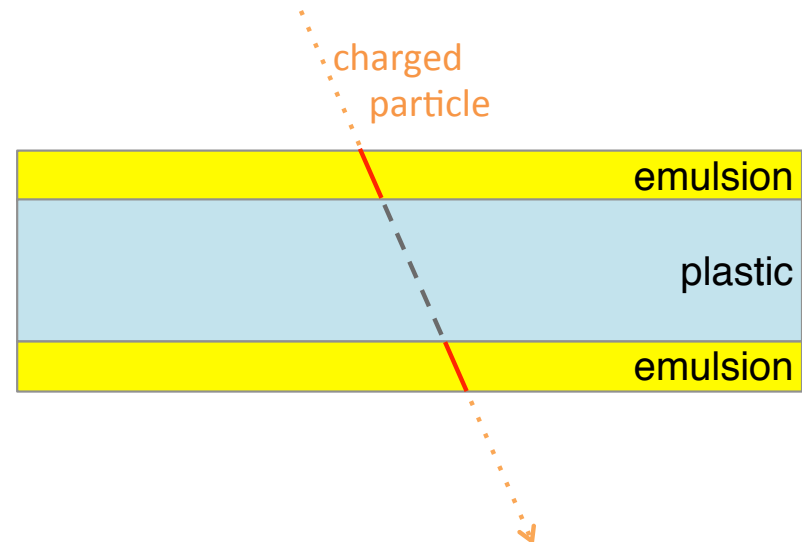
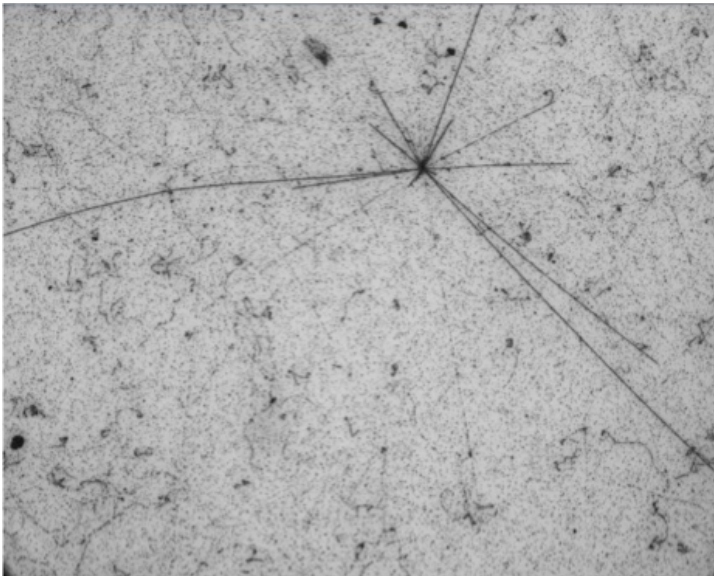
1.0×10<sup>21</sup>POTのデータを取得した時のニュートリノ反応数  
8,000イベント以上のCCQE反応および1,000イベント以上の2p-2h反応が見込まれる

# 原子核乾板

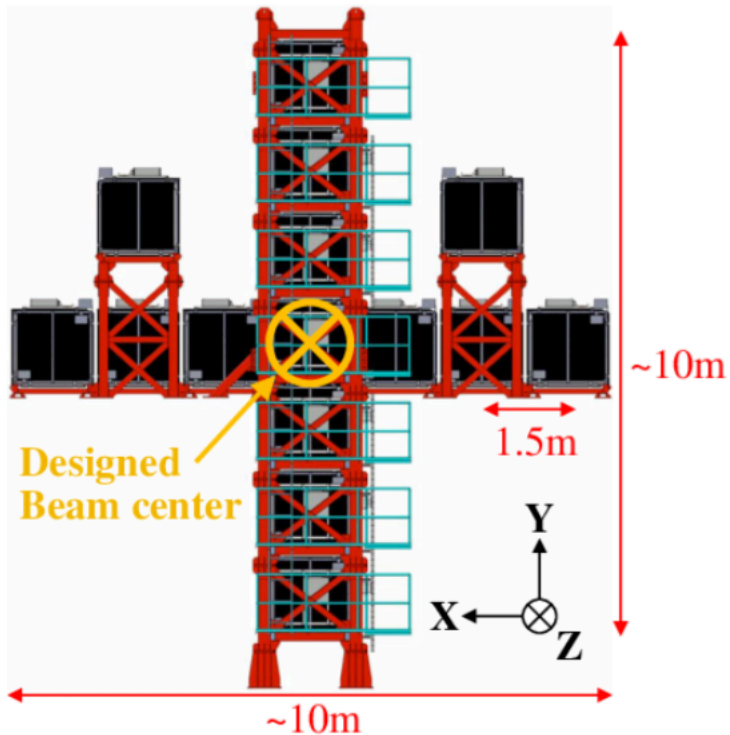
- プラスチックのうすい板にAgBrを含む乳剤を塗布
- 荷電粒子が通過することによって銀の結晶が生成→飛跡として観測

サブミクロンの位置分解能、3~5mradの角度分解能

原子核乾板の顕微鏡写真

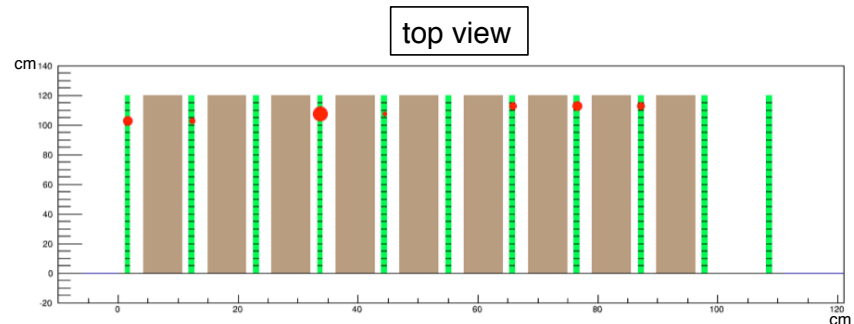
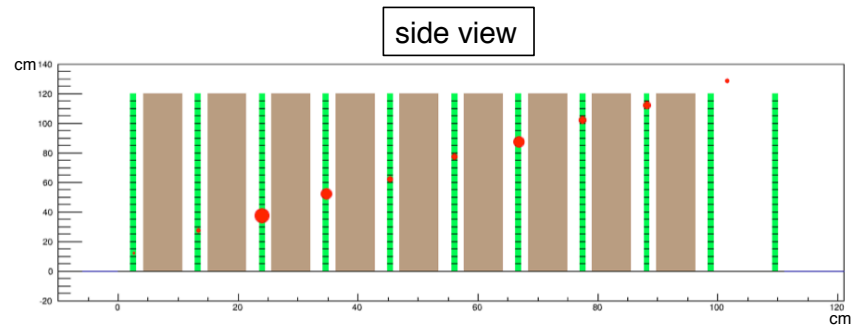


# INGRID



- ニュートリノビームの方向をモニター
- 14台のモジュールを十字形に配置
- 鉄ターゲット9層 + シンチレータ11層

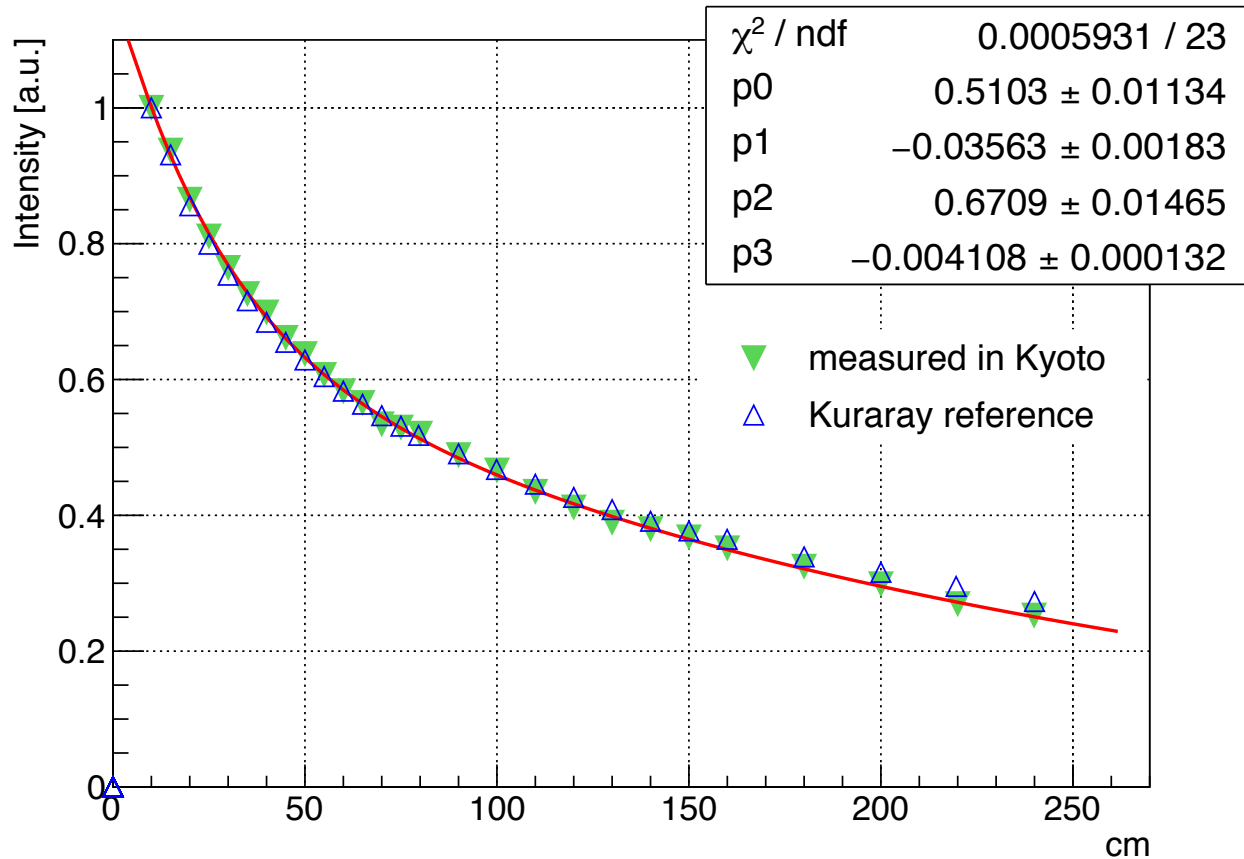
厚み1.0cm幅5.0cm



イベントディスプレイ→



# Scintillating Fiber

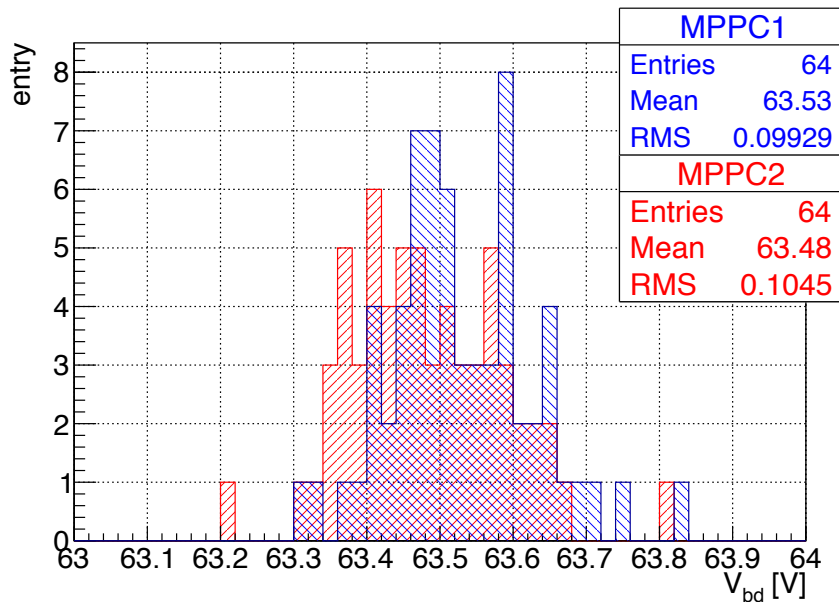


減衰長 短い成分:  $28.1 \pm 1.4 \text{ cm}$ 、長い成分:  $243.4 \pm 7.8 \text{ cm}$

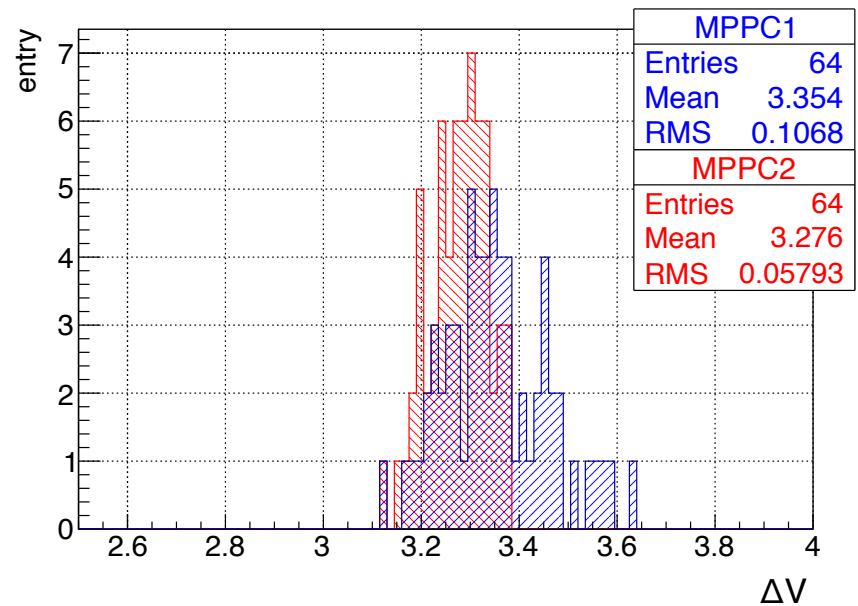
# MPPCの基本特性

- 各チャンネルのブレークダウン電圧( $V_{bd}$ )を測定→ $\Delta V$ が一定になるように調整

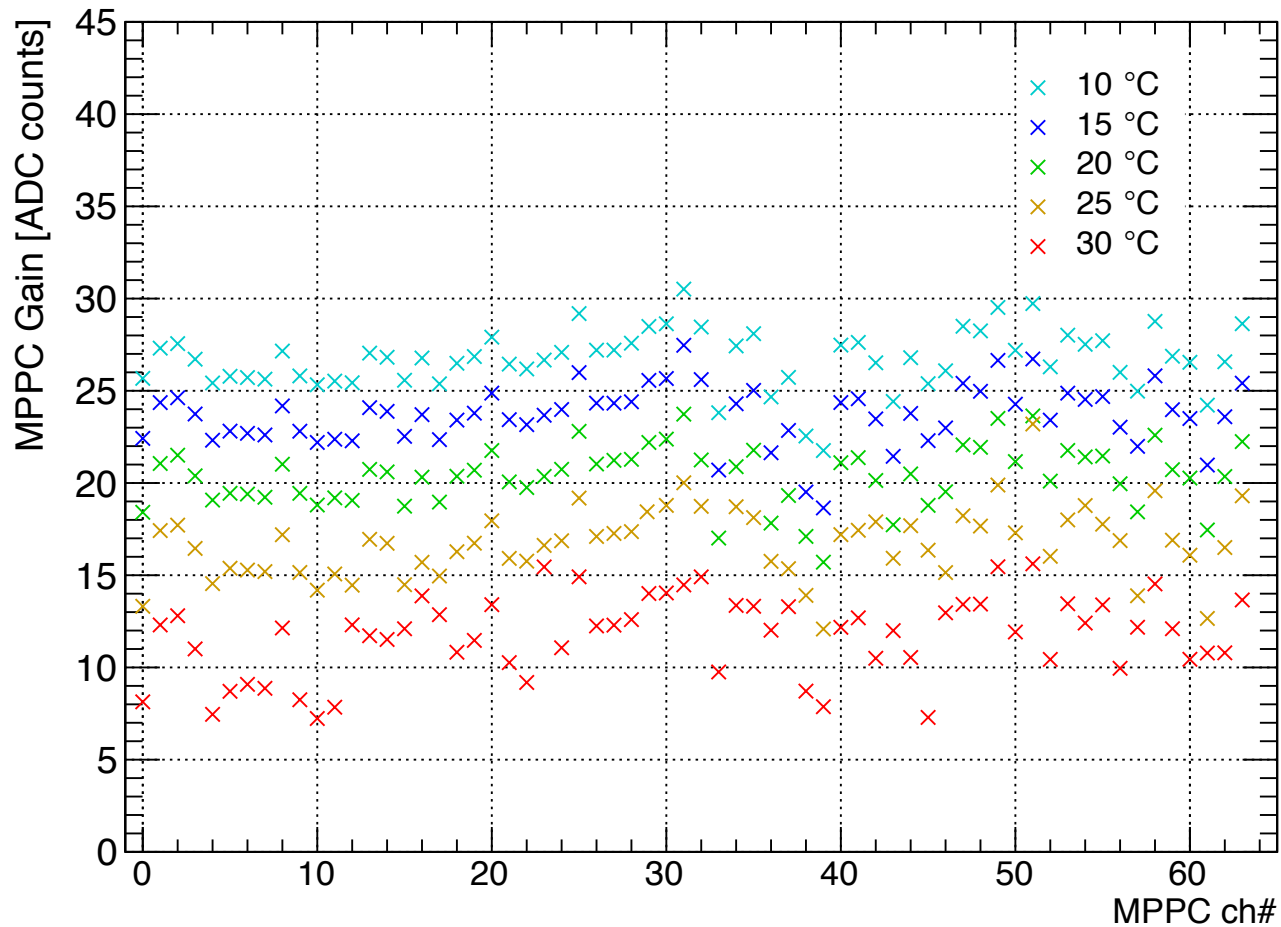
MPPCアレイ各チャンネルの $V_{bd}$



オーバー電圧(=印加電圧- $V_{bd}$ )

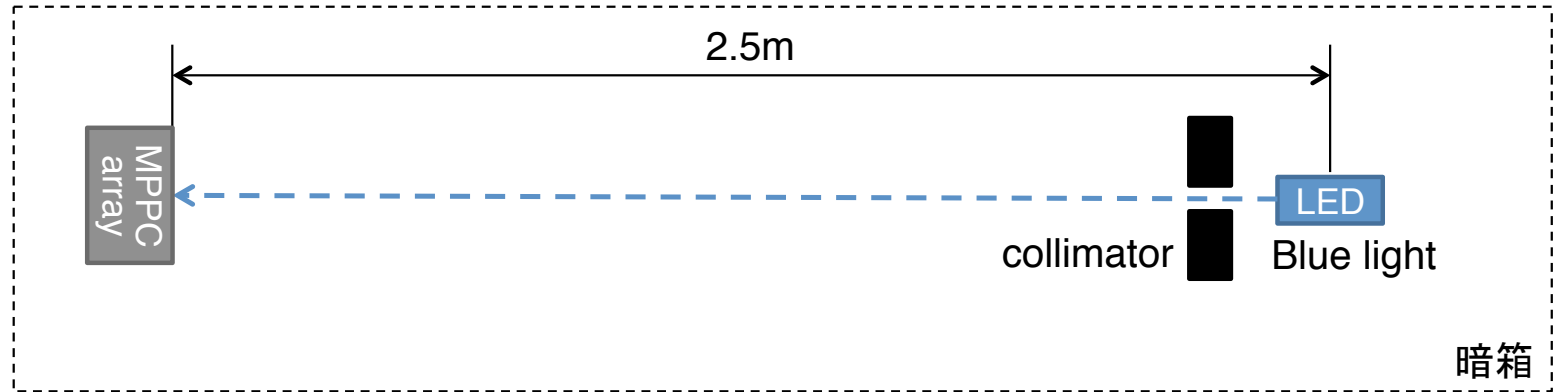


# MPPCの温度依存性



測定中は温度を $\pm 1^{\circ}\text{C}$ になるように調整

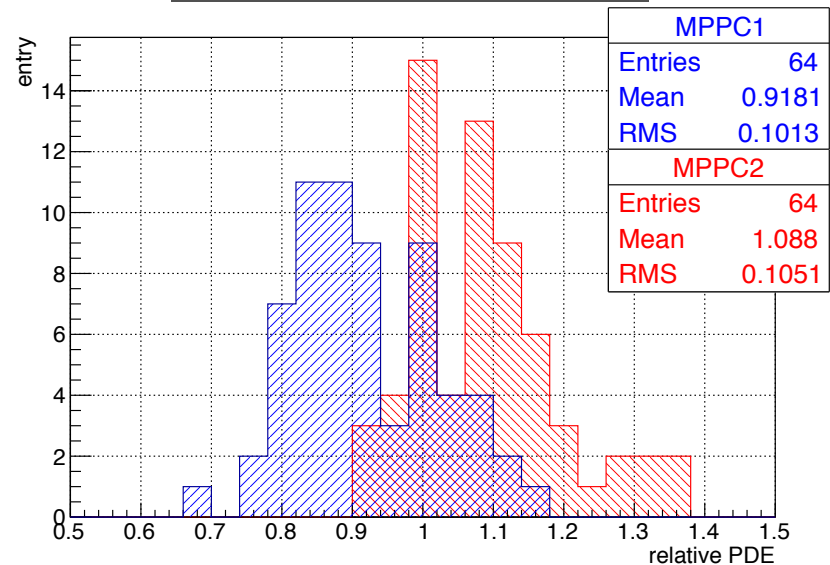
# MPPCのPDE



- PDE (Photon Detection Efficiency) のばらつきを補正するために相対PDEを測定
- 同じMPPCアレイでも10%程度ばらつく

MPPC1のほうが低い原因は表面の傷？

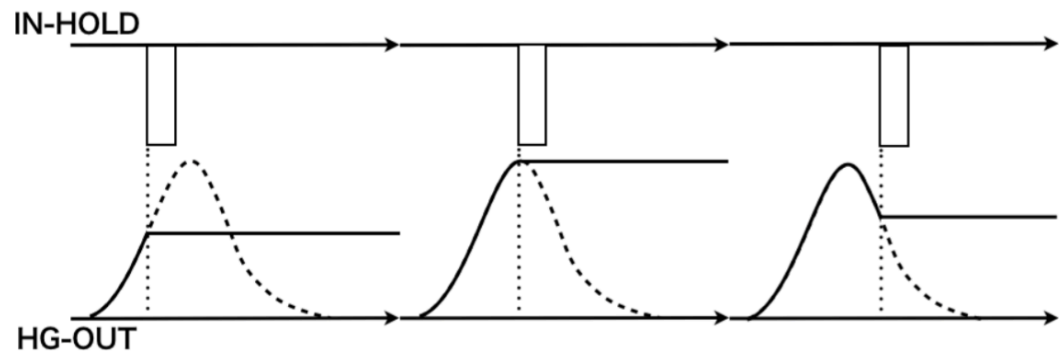
## ふたつのMPPCのPDE



# EASIROC

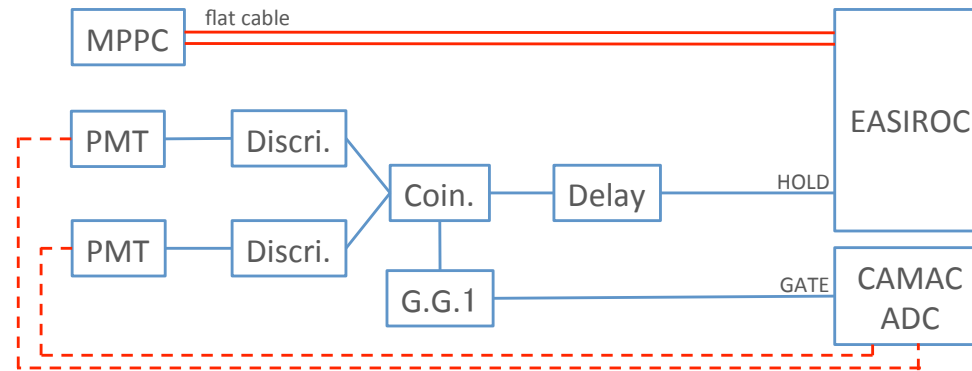


- 160fC – 320pCのダイナミックレンジ
- 入力信号は正の信号として波形整形
- ピークホールドによって信号を読み出す  
→ **ホールドタイミングの調整**が必要(外部トリガー)

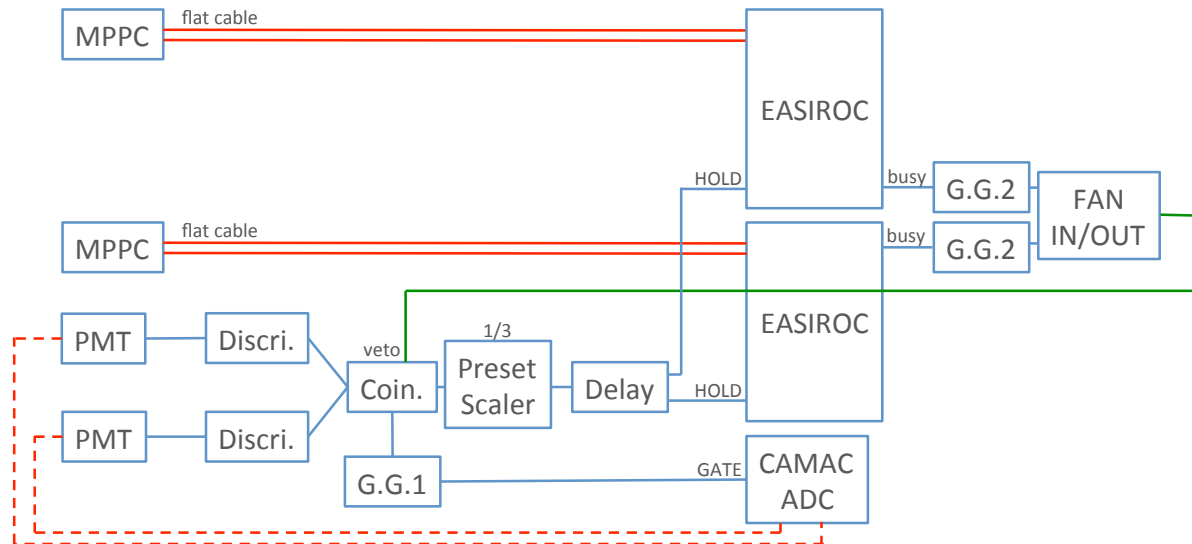


# ビームテストDAQ

片読み



両読み

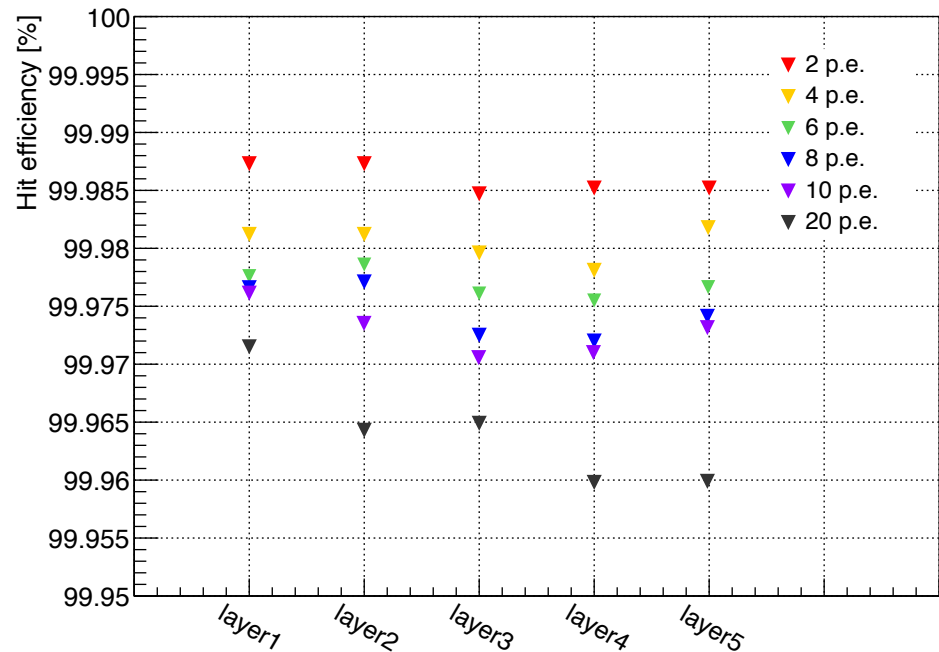
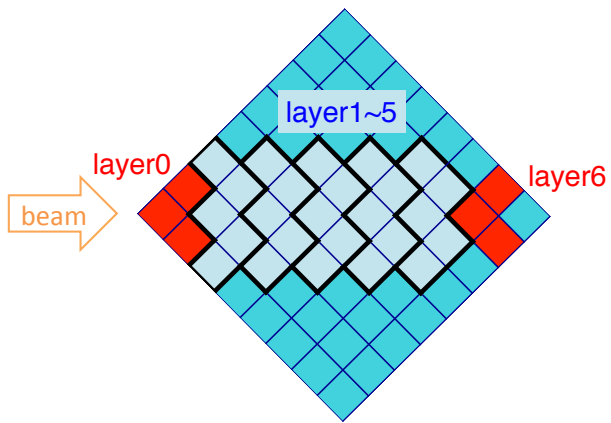


# Hit efficiency

- Hit efficiencyを以下のように定義→99.9%以上を得た

$$\text{Hit efficiency(\%)} = \frac{\text{各 layer で Hit のあったイベント数}}{\text{layer0 と layer6 両方に Hit があったイベント数}}$$

## レイヤーの定義



# 位置再構成の補正

## ▪ PDE補正

MPPCアレイのPDEがばらつくことによる光量のばらつきを補正

## ▪ Hit Cluster補正

MPPCのノイズにより誤った位置に再構成されるのをふせぐため、各レイヤーで最大光量を観測したレイヤーの両隣のチャンネルのみを位置の再構成に用いる

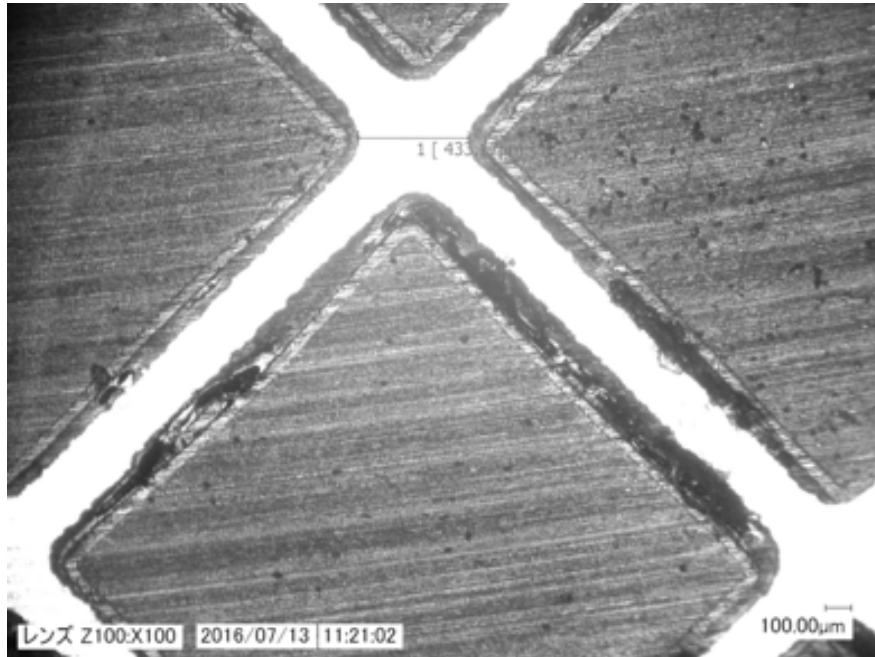
## ▪ Pile upイベントのカット

EASIROCのペDESTアルがトリガーレートに依存し、レートが高くなるとペDESTアルが低下するため、ペDESTアルの低いイベントをカット

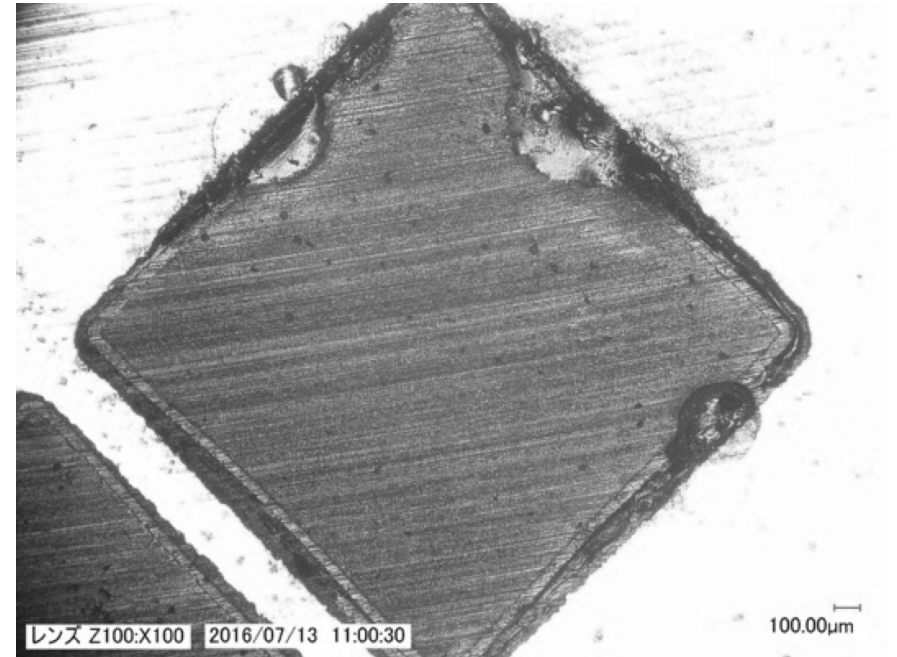


# ファイバー端面

クッキーの穴とファイバー

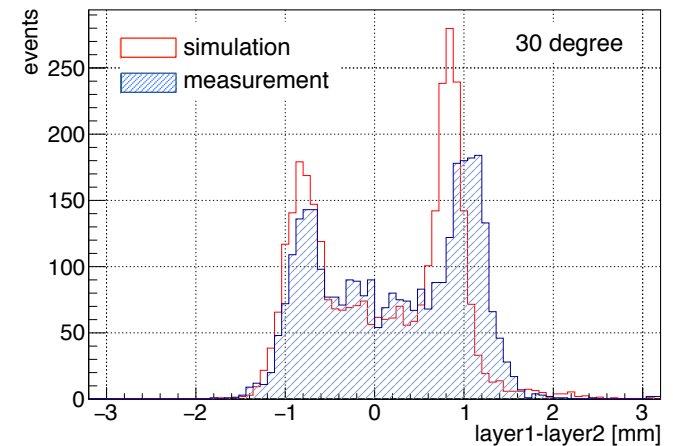
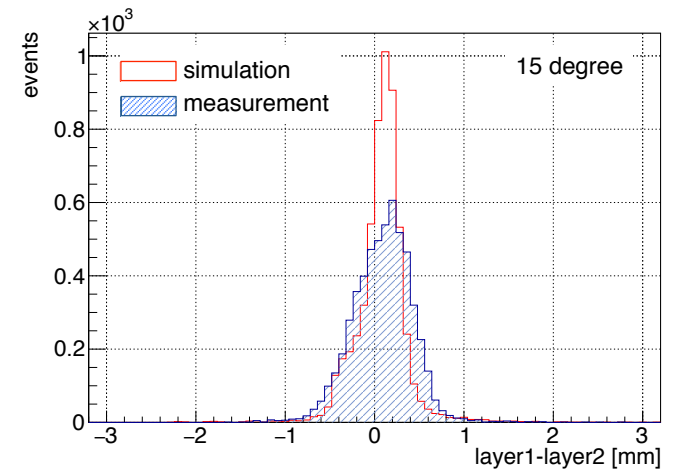
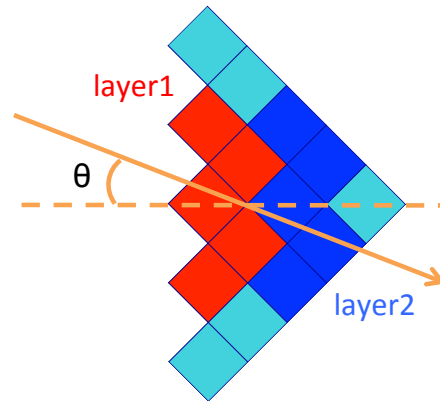


研磨によるダメージ



# 入射角度依存性

- 角度つき入射  
0,5,10,15,30,45度
- 2レイヤーの差を  
シミュレーションと比較
- 大まかに一致しているが、分布に広がりを持っている  
→ 応答を理解
- 大角度になると垂直入射のように位置を  
再構成できない  
→ 今後の課題



# チャンネル数の見積もり

- 2mm角と1mm角の場合で比較(4本/MPPC chのまとめ読みを仮定)

ファイバーの種類	2 mm 角	1 mm 角
位置分解能	~130 $\mu\text{m}$	~100 $\mu\text{m}$
ファイバーの本数 (本)	710	1420
MPPC の種類	6 × 6 mm <sup>2</sup>	3 × 3 mm <sup>2</sup>
チャンネル数/layer	305	710

- 2mm角ファイバーをまとめ読みするとMPPCの面積が広くなる  
→ノイズの問題
- MPPCの価格は面積、ファイバーの価格は断面積に依存する  
→1mm角のほうがコストは低くできるかもしれない